

3. В перспективе рекомендуется провести разработку комплексного проекта благоустройства р. Томи и снижения негативного воздействия вод. В рамках этого проекта целесообразно предусмотреть мероприятия по: систематическому предупреждению населения о рисках строительства

в пойме; выносу жилых и иных объектов из особо подверженных затоплениям частей долины; строительству и реконструкции дамб для обеспечения безопасности объектов, не подлежащих выносу; исправлению и углублению русла р. Томи для повышения его пропускной способности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лыготин В.А., Савичев О.Г., Нигороженко В.Я. Состояние поверхностных водных объектов, водохозяйственных систем и сооружений на территории Томской области в 2000–2005 гг. – Томск: Аграф-ПРЕСС, 2006. – 88 с.
2. Савичев О.Г. Математическое моделирование и прогноз русловых деформаций р. Томи в черте г. Томска (Западная Сибирь) // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311. – № 1. – С. 118–122.
3. Ботвинков В.М., Дегтярёв В.В., Седых В.А. Гидрогеоэкология на внутренних путях. – Новосибирск: Сибирское соглашение, 2002. – 356 с.
4. Бузин В.А., Болотников Г.И., Филиппов А.М. Затопления и зазоры льда на реках – методы изучения, расчёта и прогноза //

- Проблемы современной гидрологии / под ред. И.А. Шикломанова. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – С. 220–231.
5. Винников С.Д., Проскуряков Б.В. Гидрофизика. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 248 с.
6. СП 33-101-2003. Определение основных расчётных гидрологических характеристик. – М.: Госстрой России, 2004. – 72 с.
7. Попов Е.Г. Основы теории и практики гидрологических прогнозов. – Л.: Гидрометеиздат, 1963. – 295 с.
8. ГОСТ 19179-73. Гидрология суши. Термины и определения. Дата введения 1975-01-01. – М.: Изд-во стандартов СССР, 1988. – 47 с.

Поступила 30.08.2010 г.

УДК 556.3(571.1)

МЕТОДИКА РАСЧЁТА МАКСИМАЛЬНЫХ РАСХОДОВ РЕЧНЫХ ВОД В ТАЁЖНОЙ ЗОНЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

О.Г. Савичев

Томский политехнический университет
E-mail: OSavichev@mail.ru

Разработана методика определения максимальных расходов воды рек таёжной зоны Западной Сибири при отсутствии данных наблюдений, позволяющая по сравнению с существующими способами более полно учесть условия формирования максимального стока и уменьшить трудоёмкость гидрологических расчётов. Область применения методики – анализ вариантов размещения объектов строительства, математическое моделирование и прогноз максимального стока рек. Апробация методики показала, что непосредственно в формировании максимальных расходов половодья на средних реках рассматриваемой территории участвует примерно половина слоя атмосферного увлажнения за декабрь – май (снеговой покров в зимний период и дожди в апреле – мае), а в формировании летне-осенних паводочных максимумов – половина атмосферных осадков, выпадающих в августе. Разница между атмосферными осадками и условным слоем поверхностного стока близка к среднему испарению за соответствующий расчётный период.

Ключевые слова:

Максимальный расход воды, формирование водного стока, таёжная зона, Западная Сибирь.

Key words:

The maximal discharge debit, formation of a water runoff, taiga zone, Western Siberia.

Введение

Определение максимальных расходов речных вод является обязательным этапом инженерных изысканий для строительства всех водохозяйственных систем, мостовых переходов, переходов трубопроводов и ряда других сооружений. Решению этой задачи посвящено огромное количество работ, а наиболее выверенные результаты исследований вошли в соответствующие общестроительные и ведомственные нормативные документы [1, 2]. Тем не менее, ряд вопросов расчёта максимального стока на гидрологически неизученных террито-

риях в условиях меняющегося климата остаётся недостаточно раскрытым. В частности, при использовании формул для вычисления максимальных расходов воды весеннего половодья и дождевых паводков наблюдается высокая степень неоднозначности при определении границ половодья и паводков (следовательно, и соответствующего слоя стока), оценке влияния болот, озёр и лесистости, условий стекания дождевых вод.

Кроме того, не совсем ясно, как практически учитывать изменения статистических параметров гидрологических характеристик (слой весеннего

половодья, максимальный суточный слой осадков и т. д.). Непонятно и то, как совместить требования по проведению полевых наблюдений [1, 2] на труднодоступных территориях при отсутствии режимных постов с условиями конкурсов на проведение инженерных изысканий и проектирования, как правило, в ограниченные сроки при минимальной стоимости работ. Косвенным, но очень важным подтверждением актуальности этих вопросов являются факты периодически отмечаемых затоплений населённых пунктов, полного или частичного разрушения дамб, мостовых переходов, дорожных водосбросных сооружений, аварий на переходах через реки трубопроводов [3, 4].

Необходимо отметить, что в [1] изложены подходы, в целом позволяющие обеспечить объективную оценку гидрологических характеристик, но при этом в ряде случаев (особенно на слабо изученных территориях азиатской части Российской Федерации) требуется использование тех или иных районных параметров или зависимостей. С учётом этого в рассматриваемой работе предлагается методика расчёта максимальных расходов воды, соответствующая требованиям [1], но позволяющая: 1) более чётко оценить влияние различных болотных и лесных биогеоценозов на максимальный сток; 2) учесть нестационарность гидрометеорологических процессов; 3) обеспечить большую оперативность при проведении гидрологических расчётов, что особенно актуально при анализе разных вариантов размещения водохозяйственных сооружений, мостов и трасс трубопроводов.

Обоснование методики расчёта максимального стока

Согласно современным представлениям [1, 5], все формулы максимальных расходов делятся на три основные группы: 1) редуционные, отражающие уменьшение модуля стока с возрастанием площади водосбора; 2) предельной интенсивности, связывающие максимальный расход $Q_{\max}$ с наибольшей интенсивностью водоотдачи из снегового покрова или дождя за время добегания; 3) объёмные, характеризующие связь максимальных расходов с объёмом или слоем стока и продолжительностью половодья или паводка. Фактически во всех трёх случаях речь идёт о зависимости вида (1), в которой объём стока W за характерное время (продолжительность половодья или паводка) связывается со значением слоя половодья или атмосферных осадков заданной обеспеченности, а время добегания τ задаётся при определённых допущениях о форме гидрографа, либо обратно пропорционально площади водосбора, либо вычисляется по морфометрическим характеристикам русла и водосбора.

$$Q_{\max} = \frac{W}{\tau} = VBh_T, \quad (1)$$

где V — средняя скорость перемещения водных масс слоем h_T и шириной B .

Нами предлагается использовать выражение (1) при условии, что величина h_T при условии минимума потерь стока и их относительном постоянстве для конкретной природной зоны линейно связана с общим увлажнением водосбора (суммой водоотдачи из снежного покрова и жидких атмосферных осадков), средняя скорость может быть определена по формуле Шези, а величина B близка к средней ширине водосбора, то есть в виде:

$$Q_{\max, P} = \frac{\lambda_P B (aR_{T, 1\%} + b)^{5/3} \sqrt{J}}{n_{cp}}, \quad (2)$$

где $Q_{\max, P}$ — максимальный расход воды расчётной обеспеченностью P ; λ_P — коэффициент перехода от расхода воды обеспеченностью 1 % к расходу обеспеченностью P ; $R_{T, 1\%}$ — атмосферное увлажнение за расчётный период обеспеченностью 1 %; a , b — эмпирические константы, отражающие долю общего увлажнения, формирующего максимальный расход, и суммарные потери стока для рассматриваемой природной зоны; J — уклон водной поверхности, принимаемый с учётом доступных данных Росгидромета [6, 7] как средневзвешенный уклон реки. Формулу (2) можно получить и другими способами, например, выразив объём стока через площадь водосбора и слой стока, а время добегания — через средний путь и скорость стекания.

Величина n_{cp} в формуле (2) может быть определена как среднее взвешенное из значений коэффициента шероховатости поверхности биогеоценозов водосбора n_i , например, в наиболее общем виде:

$$n_{cp} = \sum \frac{n_i}{f_i} / \sum \frac{1}{f_i},$$

где f_i — озёрность, заболоченность или лесистость водосбора (в перспективе целесообразен переход к более детальному рассмотрению биогеоценозов). Таким образом, остаётся выбрать характерный период для оценки общего увлажнения и определить значения a , b по данным наблюдений обратным расчётом по формуле (2).

Ограничением рассматриваемой модели максимального стока, представляющей собой произведение средней скорости V перемещения виртуального фронта половодья (паводка) сечением $h_T B$, является необходимость проведения расчётов для территорий, однородных по условиям формирования стока, то есть для водосборов малых и средних рек. Для больших рек (с площадью водосбора более 50000 км²) целесообразно использовать комбинированную формулу, позволяющую оценить максимальный сток и время добегания на отдельных участках и учитывающую асинхронность гидрологических процессов. В целом эту модель можно усложнить за счёт использования уравнения баланса для слоя h_T , введения весовых коэффициентов при расчёте среднего коэффициента шероховатости и уточнения значений n_i поверхности различных биогеоценозов.

Апробация методики

Апробация расчётной формулы (2) выполнена по данным наблюдений Росгидромета на гидрологических постах и метеостанциях в таёжной зоне Западной Сибири. Схема размещения гидрологических постов приведена на рис. 1. Все исследуемые реки являются притоками р. Оби на участке её среднего течения. Для расчётов использовались опубликованные данные о максимальных расходах воды весеннего половодья $Q_{\max, \text{пол}}$ и паводков $Q_{\max, \text{пав}}$, слое максимальных суточных осадков обеспеченностью 1 %, морфометрических характеристик рек и их водосборов [6, 7] и материалы сайта www.meteo.ru о месячных атмосферных осадках. В последнем случае проводилась проверка на наличие симметричности в рядах наблюдений согласно [8] и определение статистических параметров (среднее арифметическое, дисперсия, коэффициент вариации и асимметрии). Принятые значения максимальных расходов воды половодья $Q_{\max, \text{пол}}$ и паводков $Q_{\max, \text{пав}}$ обеспеченностью 1 %, средневзвешенного уклона рек J , а также вычисленные значения средней ширины водосборов B и среднего коэффициента шероховатости $n_{\text{ср}}$ приведены в табл. 1. Значения n_i установлены с учётом анализа полевых наблюдений и согласно [1] из следующих соображений для: 1) озёр – 0,05; 2) болот –

0,14; 3) леса – 0,20; 4) открытых безлесных и незаболоченных участков – 0,03.

Для всех рассмотренных метеостанций гипотеза о нормальном законе распределения вероятностей была отклонена, что, с учётом рекомендаций [9], позволило использовать логнормальное распределение, в соответствии с которым были вычислены значения сумм месячных осадков, суммы за декабрь – март, декабрь – апрель – март, декабрь – май, июнь – июль, июль – август, июль – сентябрь с обеспеченностью 1 %. После этого для геометрических центров водосборов методом среднего взвешенного (по расстояниям до 3–4 ближайших метеостанций) были вычислены максимальные значения общего увлажнения. Аналогичный расчёт проводился также и для месячных сумм жидких и твёрдых осадков с учётом возможности выпадения дождей при отрицательной среднемесячной температуре атмосферного воздуха вплоть до минус 15 °C [10].

Затем был выполнен корреляционный и регрессионный анализ гидрометеорологической информации с выделением наиболее значимых факторов с уровнем значимости 5 % (табл. 2, рис. 2, 3). При этом зависимость вида $h_T = aR_T + b$ считалась удовлетворительной, если коэффициенты регрессии a и b превышали удвоенную погрешность их определе-

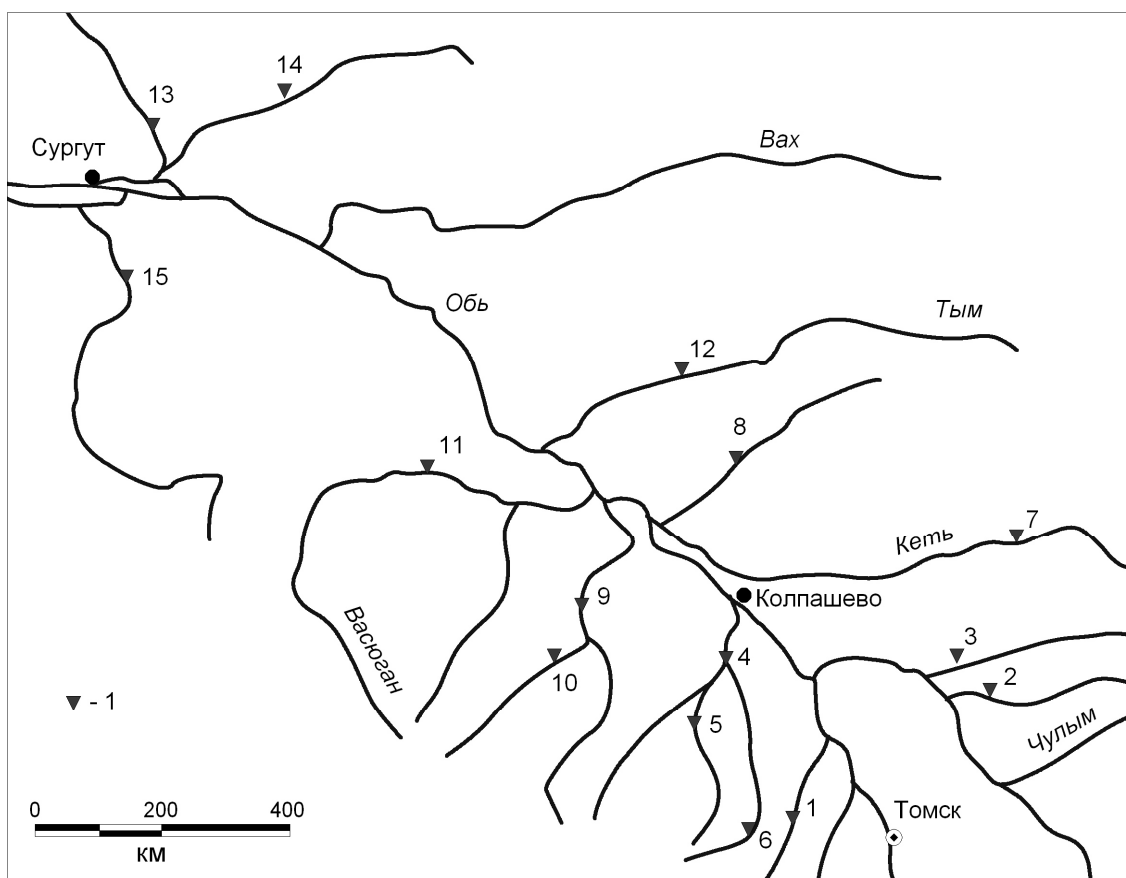


Рис. 1. Схема размещения гидрологических постов (1) в таёжной зоне Западной Сибири

ния, а квадрат корреляционного отношения ρ^2 был больше или равен 0,36 [8]. В результате было установлено, что в формировании максимального расхода воды половодья принимает участие половина атмосферных осадков в течение периода с декабря по май включительно за вычетом около 100 мм, которые, согласно [6], расходуются преимущественно на испарение в апреле – мае.

Таблица 1. Гидрологические и морфометрические характеристики объектов исследований

Номер на рис. 1	Река	Пункт	$Q_{\text{пол,1\%}}$, м ³ /с [6]	$Q_{\text{пав,1\%}}$, м ³ /с [6]	I , м/км [7]	B , км [7]	$n_{\text{ср}}$
1	Шегарка	с. Боборыкино	882	62,6	0,20	33,8	0,134
2	Чичка-Юл	п. Франца	554	116	0,16	15,5	0,196
3	Улу-Юл	с. Аргат-Юл	779	123	0,24	22,6	0,193
4	Чая	с. Подгорное	1190	372	0,21	57,6	0,171
5	Бакчар	с. Гореловка	346	136	0,15	21,1	0,159
6	Икса	с. Плотниково	252	53,4	0,14	16,6	0,169
7	Кеть	с. Максимкин Яр	2680	1015	0,14	38,0	0,177
8	Пайдугина	с. Березовка	722	189	0,23	22,6	0,174
9	Парабель	с. Новиково	750	416	0,08	33,7	0,175
10	Чузик	с. Осипово	322	315	0,12	22,5	0,178
11	Васюган	с. Средний Васюган	1090	561	0,07	39,0	0,173
12	Тым	с. Напас	1140	476	0,12	36,1	0,177
13	Тром-Юган	с. Ермаково	774	396	0,18	32,1	0,136
14	Аган	с. Вар-Еган	865	814	0,10	57,8	0,153
15	Большой Юган	с. Угут	1560	530	0,06	24,6	0,171

Примечания: $Q_{\text{пол,1\%}}$ – максимальный расход половодья; $Q_{\text{пав,1\%}}$ – максимальный расход дождевого паводка; I – средневзвешенный уклон реки; B – средняя ширина водосбора; $n_{\text{ср}}$ – расчётное среднее значение коэффициента шероховатости поверхности водосбора.

Таблица 2. Статистически значимые коэффициенты корреляции между характеристиками атмосферного увлажнения, слоем половодья ($h_{T,1}$) и паводков ($h_{T,2}$)

Сумма жидких осадков с обеспеченностью 1 %	$h_{T,1}$	$h_{T,2}$
Январь	–	–0,51
Февраль	0,55	–
Май	0,64	0,73
Июнь	–	0,49
Август	0,55	0,57
Ноябрь	0,50	–
Апрель – июнь	–	0,45
Атмосферные осадки (жидкие и твёрдые) за декабрь – май	0,79	0,76

Примечание: при $|r| \geq 2(1-r^2)/N^{0.5}$, где r – коэффициент корреляции; N – объём выборки.

Для слоя паводочного стока в летне-осенний период зависимость от атмосферных осадков выражена в целом слабее, чем для стока половодья, что объясняется большим разнообразием условий формирования потерь на испарение, поверхност-

ное задержание, аккумуляцию в болотах и почвогрунтах. При этом следует отметить, что, во-первых, статистически значимые связи не были выявлены для слоя максимальных суточных осадков и сумм осадков за июль, сентябрь, июнь – август, июнь – сентябрь обеспеченностью 1 %, но установлены для суммы осадков за август. Во-вторых, как и в случае максимального стока за половодье, формирование пика летне-осеннего паводка происходит примерно за счёт половины атмосферных осадков, а коэффициент b примерно соответствует среднемулетнему испарению за расчётный период (в данном случае – за август [6]).

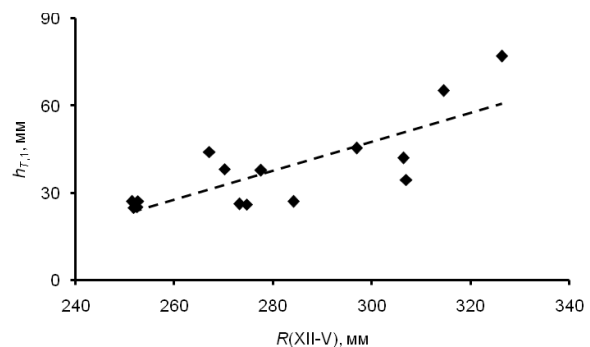


Рис. 2. Зависимость между величиной $h_{T,1}$ для половодья и суммой атмосферных осадков за декабрь – май с обеспеченностью 1 %; $h_{T,1} = 0,50 R (XII-V) - 101,33$; $\rho^2 = 0,63$

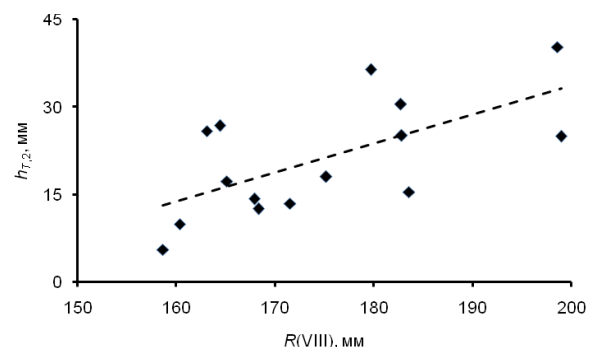


Рис. 3. Зависимость между величиной $h_{T,2}$ для паводка и суммой атмосферных осадков за август с обеспеченностью 1 %; $h_{T,2} = 0,50 R (VIII) - 66,16$; $\rho^2 = 0,41$

Таким образом, формула (2) может быть использована для предварительного обоснования различных вариантов размещения объектов строительства на гидрологически неизученных и труднодоступных таёжных территориях Западной Сибири, что позволит существенно уменьшить трудоёмкость и увеличить обоснованность принятых решений. Кроме того, данная методика может быть адаптирована для долгосрочных прогнозов максимальных расходов воды рек региона с использованием данных о максимальных расходах воды и суммах атмосферных осадков за каждый год периода наблюдений. Прогноз может выдаваться в середине – конце марта с учётом разных вариантов атмосферного увлажнения в апреле – мае

(средних или максимальных значений). В качестве примера приведём зависимость для прогноза суточных максимумов половодья на р. Тым у с. Напас ($\rho^2=0,47$):

$$Q_{\max} = 2,234(0,081 R(XII - V) + 20,71)^{5/3}.$$

Также может быть выполнен сверхдолгосрочный прогноз максимального стока с использованием трендов изменения атмосферных осадков и морфометрических характеристик водосбора, например, сокращения лесистости в результате заболачивания, пожаров и рубок леса.

Выводы

1. Разработана методика расчёта максимальных расходов воды, позволяющая уменьшить трудоёмкость гидрологических расчётов при анализе вариантов размещения объектов строительства и достоверно оценить изменение максимального стока при варьировании атмосферного увлажнения, а также лесистости, озёрности и заболоченности в результате природных процессов и антропогенного изменения окружающей среды. Другие области применения методики — долгосрочный прогноз и моделирование максимального стока для различных вариантов природообустройства (лесомелиорация, ре-

культивация нарушенных земель, водохозяйственное строительство).

2. Методика позволяет понять и количественно оценить различия в условиях формирования стока в пределах различных биогеоценозов, что (при определении соответствующих коэффициентов шероховатости) повысит точность определения расчётных гидрологических характеристик и прогнозов максимального стока. Открываются широкие перспективы для внедрения методов дистанционного зондирования Земли с целью разработки и/или уточнения ландшафтных и экологических карт речных водосборов, что увеличит эффективность и достоверность гидрологических расчётов.
3. Апробация методики показала, что формирование максимальных расходов половодья на средних реках таёжной зоны Западной Сибири происходит примерно за счёт половины слоя атмосферного увлажнения за декабрь — май (снеговой покров в зимний период и дожди в апреле — мае), а паводочных максимумов — за счёт половины количества атмосферных осадков в августе. Разница между слоями атмосферных осадков и поверхностного стока близка к среднему слою испарения за соответствующий расчётный период.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 33-101-2003. Свод правил. Определение основных расчётных гидрологических характеристик. — М.: Госстрой России, 2004. — 72 с.
2. СП 11-103-97. Свод правил. Инженерно-гидрометеорологические изыскания для строительства. — М.: Госстрой России, 1997. — 32 с.
3. Лыготин В.А., Савичев О.Г., Нигороженко В.Я. Состояние поверхностных водных объектов, водохозяйственных систем и сооружений на территории Томской области в 2000–2005 гг. — Томск: АГРАФ-ПРЕСС, 2006. — 88 с.
4. Экологический мониторинг: состояние окружающей среды Томской области в 2007 году / под ред. А.М. Адама. — Томск: Графика, 2008. — 148 с.
5. Орлов В.Г., Сикан А.В. Основы инженерной гидрологии. — СПб.: Изд-во «Северо-Запад», 2009. — 192 с.
6. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 15. Алтай и Западная Сибирь. Вып. 2. Средняя Обь / под ред. Н.А. Паниной. — Л.: Гидрометеиздат, 1972. — 408 с.
7. Основные гидрологические характеристики. Т. 15. Алтай, Западная Сибирь и Северный Казахстан. Вып. 1. Верхняя и Средняя Обь / под ред. Е.П. Шурупа. — Л.: Гидрометеиздат, 1979. — 488 с.
8. Международное руководство по методам расчёта основных гидрологических характеристик / под ред. А.В. Рождественского и А.Г. Лобановой. — Л.: Гидрометеиздат, 1984. — 247 с.
9. Виссмен У., Харбаф Т.И., Кнэпп Д.У. Введение в гидрологию. — Л.: Гидрометеиздат, 1979. — 470 с.
10. Савичев О.Г. Водные ресурсы Томской области. — Томск: Изд-во ТПУ, 2010. — 248 с.

Поступила 30.08.2010 г.